

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Pat ntschrift
10 DE 196 42 247 C 1

51 Int. Cl.⁸:
A 61 C 5/10
A 61 C 5/04

21 Aktenzeichen: 196 42 247.7-23
22 Anmeldetag: 12. 10. 96
43 Offenlegungstag: —
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 15. 1. 98

DE 196 42 247 C 1

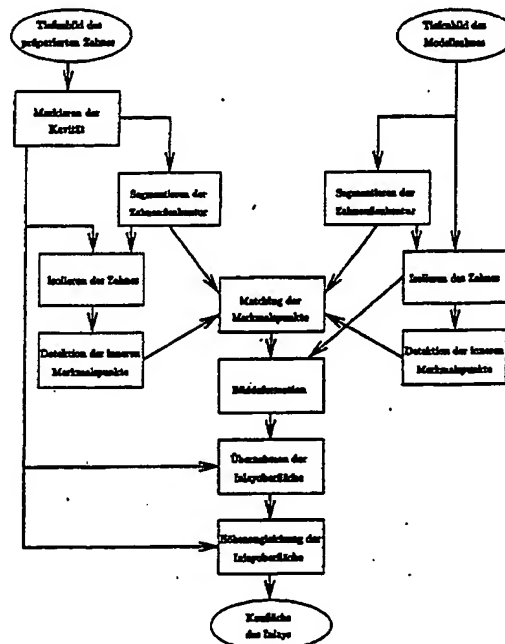
Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:
Meller, Sebastian, 91054 Erlangen, DE
74 Vertreter:
Patentanwälte Raeck & Hössle, 70182 Stuttgart

72 Erfinder:
gleich Patentinhaber
58 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:
US 52 73 429
US 48 56 993
US 47 68 704
US 47 42 484
US 47 34 034
Kass et al: Snakes: Active Contour Models, Proc.
First Int. Conf. on Computer Vision (ICCV), London,
1987, S. 259-268;
Wolberg, G.: Digital Image Warping, IEEE CS Press,
1990;

54 Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils

57 Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils für einen präparierten Zahn, dessen Höhenprofil als aus punktweise abgetasteten Höhenwerten zusammengesetztes digital gespeichertes Tiefenbild vorliegt, wobei zum Bestimmen der Form des Zahnersatzteiles ein Tiefenbild eines intakten Musterzahnes von gleichem Typ wie der präparierte Zahn durch Bilddeformation mit dem Tiefenbild des präparierten Seitenzahnes zur Deckung gebracht, die Höheninformation für den präparierten Bereich des präparierten Zahnes aus dem deformierten Tiefenbild des Musterzahnes übernommen und die übernommene Höheninformation durch Höhenangleichung an die Höhenwerte des Zahnstumpfes am Rand des präparierten Bereiches des präparierten Zahnes angepaßt wird. Erfindungsgemäß wird somit eine natürlich geformte Zahnform restauriert, deren Oberflächendaten zur Herstellung des Zahnersatzteils aus einem Materialrohling mittels einer rechnergesteuerten Werkzeugmaschine verwendet werden können.



DE 196 42 247 C 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils für einen gegebenen präparierten Zahn, insbesondere Seitenzahn.

Um einen beschädigten Zahn zu reparieren, muß zunächst die Karies oder der Rest einer vorherigen Füllung entfernt, der beschädigte Bereich geglättet und für eine Füllung oder Krone präpariert werden. Die Form der dabei entstehenden Aushöhlung oder Kavität ist abhängig von dem Füllungsmaterial, das verwendet werden soll. Als Füllungsmaterialien kommen Amalgame oder Kunststoff in Frage, die in plastischer Form in den Zahn eingebracht und erst nach der Formgebung gehärtet werden, oder Werkstoffe wie Keramik und Gold, zum Teil auch Kunststoffe, die in fester Form in den Zahn eingesetzt werden, wobei die Form vor dem Einsetzen schon festliegt. Obwohl Amalgame als Füllungsmaterial seit über 100 Jahren verwendet werden und aus zahnärztlicher Sicht nach wie vor in Bezug auf Verarbeitbarkeit und Festigkeit zu den besten Füllungsmaterialien zählen, sind sie in letzter Zeit aufgrund der Quecksilber-Belastung des Körpers in Verruf geraten. Außerdem kam mehr und mehr der Wunsch nach zahnfarbenen Materialien auf. Dazu zählen sowohl spezielle Kunststoffe, sogenannte Komposite, als auch Keramik. Die Festigkeit bisher verwendeter Komposite ist begrenzt, so daß diese meist nur für kleinere Füllungen verwendet werden. Dagegen ist es mit Keramik möglich, auch größere Teile des Zahnes zu ersetzen. Außerdem ist Keramik in Bezug auf seine Härte mit der Außenschicht eines gesunden Zahnes, dem Zahnschmelz, vergleichbar.

Bei den in fester Form eingesetzten Füllungen spricht der Zahnarzt von Einlagerrestaurationen. Dazu zählen Inlays, Onlays und Overlays oder Teilkronen. Inlays bedecken nur Teile der Kaufläche, Onlays die ganze. Beide werden nur im Zahnkern verankert, während bei Overlays die Verankerung auch am Zahnrand stattfindet. Im folgenden wird vereinfachend von Restaurationen gesprochen.

Die Form einer Restauration ist einerseits bestimmt durch die Form der Kavität, in die sie eingesetzt werden soll, andererseits durch die gewünschte äußere Form der Kaufläche. Ist die Restauration erstellt, kann sie mit einem speziellen Zement am vorhandenen Zahnstumpf befestigt werden. In weiterer Handarbeit wird sie beschliffen, um sie möglichst gut an die gegebenen Verhältnisse anzupassen. Im Falle von harter Keramik sind diese Nacharbeiten langwierig und für den Patienten unangenehm, da sie teilweise im Mund ausgeführt werden müssen. Zudem wird beim Schleifen automatisch auch gesunde Zahnschubstanz mit abgetragen.

Bei der Formgestaltung der Restauration sind mehrere Kriterien zu berücksichtigen: Die Restauration muß in die präparierte Kavität eingepaßt werden. Hohlräume und Spalten können zwar durch den Befestigungszement ausgeglichen werden, falls die Restauration zu klein ist. Dieser wäscht sich jedoch mit der Zeit heraus und birgt die Gefahr von Kariesentstehung in den Randspalten. Ist die Restauration zu groß, kann sie erst gar nicht eingesetzt werden.

Der restaurierte Zahn soll in seinem Kontaktbereich zu den Nachbarzähnen den richtigen Abstand und die richtige Form haben. Beides ist vom Zahntyp abhängig.

Die Zähne des Gegenkiefers (Antagonisten) müssen in dem Sinne berücksichtigt werden, daß beim Aufeinanderbeißen der Zähne eine möglichst gleichmäßige Druckbelastung erreicht wird. Der Zahnarzt spricht hier von Okklusion. Folgen von falsch sitzenden Restaurationen können Kaubeschwerden, Beschädigung des Zahnnerves verbunden mit Überempfindlichkeit und Zahnschmerz sowie Kiefergelenkprobleme sein.

Des weiteren soll die Oberfläche der Restauration eine stetige Oberfläche haben, so daß sie stetig in die Oberfläche des Restzahnes übergeht. Mathematisch gesehen ist hier nicht nur Stetigkeit der Oberfläche gemeint, sondern auch Stetigkeit ihrer ersten Ableitung.

Die erzeugte Kaufläche sollte darüber hinaus auch in ihrem optischen Eindruck die natürlichen Strukturen der Kaufläche, also Erhebungen, Gräben und Vertiefungen enthalten, die für einen Seitenzahn typisch sind, soweit sich dies nicht zwingend aus den vorstehend erläuterten Kriterien ergibt.

Der klassische Weg der Herstellung einer Restauration ist sehr langwierig, da er mehrere Behandlungssitzungen für den Patienten und mehrere Bearbeiter umfaßt und ist aus diesem Grunde sehr teuer. Der Zahnarzt präpariert den Zahn und erstellt einen Negativabdruck des gesamten Gebisses. Dieser Abdruck wird an einen Zahntechniker weitergegeben, der daraus ein Positiv-Gipsmodell des Gebisses herstellt. Auf diesem modelliert er mit einem provisorischen plastischen Material, bei dem es sich meistens um Wachs handelt, die Füllung. Um die vorstehend erläuterten Kriterien zu berücksichtigen, werden die Modelle des Ober- und Unterkiefers mittels eines sogenannten Artikulators einander zugeordnet. Mit Hilfe dieses Artikulators können Kaubewegungen mitsamt den dabei auftretenden Seitenbewegungen simuliert werden. Die Kontaktpunkte zu den Antagonisten können mit einer sogenannten Okklusionsfolie festgestellt werden. Aus der provisorischen Restauration wird dann über verschiedene mögliche Verfahren mit mehreren Teilschritten die Füllung aus dem Keramikmaterial geformt und gebrannt. Dabei muß wiederum beachtet werden, daß beim Brennen eine Schrumpfung eintritt, die durch eine absichtlich zu große Form vor dem Brennen ausgeglichen werden muß. Ein Nachteil dieser klassischen Herstellungsmethode ist auch, daß beim Brennen der unregelmäßigen Form unterschiedliche Materialeigenschaften entstehen.

Aus der US 4,766,704 ist ein Verfahren bekannt, bei welchem die Restauration direkt aus einem schon gebrannten Keramikrohling herausgearbeitet werden kann. Unter der Verwendung eines modernen CAD-Systems (Computer Aided Design) gestattet das bekannte Verfahren die Modellierung der Restauration am Bildschirm und das nachfolgende Fräsen der Restauration in einer integrierten Fräseinheit. Der präparierte Zahn wird dabei mit einer speziellen Kamera im Mund des Patienten aufgenommen. Neben einem Grauwertbild einer konventionellen Kamera entsteht dabei ein sogenanntes Tiefenbild, das zu jedem sichtbaren Punkt des aufgenommenen Bereiches den Abstand zur Kameraebene angibt. Für den Zahnarzt am Bildschirm des Steuergerätes erscheint wahlweise das Grauwertbild oder das Tiefenbild des präparierten Zahnes. Mit einer Maus oder einem Trackball werden zunächst die Kavitätsränder und der Zahnrand im Bild markiert. Der Computer berechnet daraus die Form der Unterseite der Restauration zur Randanpassung. Weiterhin wird durch die Eingabe von Hilfslinien die Kaufläche der künftigen

Restauration definiert. Die Strukturen wie Zahnhöcker, Gräben und Vertiefungen müssen dabei vom Zahnarzt vorgegeben werden. Diese Arbeit erfordert ein großes Abstraktionsvermögen des Zahnarzts, der beim Modellieren auf die 2-dimensionale Darstellung des Bildschirms angewiesen ist, um ein 3-dimensionales Objekt zu definieren und herzustellen. Die eingegebenen Linien werden mit Hilfe eines Computers mathematisch interpoliert, um Volumendaten der Restauration zu erstellen, welche wiederum an die Fräsmaschine (NC-Maschine) weitergegeben werden. Die Kaufläche einer derart erstellten Restauration ist meist sehr grob und muß noch nachgearbeitet werden. Der Zeitbedarf für eine Behandlung gemäß dem bekannten Verfahren liegt abhängig von der Größe der Restauration bei durchschnittlich 60 Minuten, wovon etwa 15 Minuten für die Modellierung der Restauration am Bildschirm und etwa 30 Minuten für das Einsetzen und Nachbearbeiten der Restauration benötigt werden.

Aus der US 4,742,464 ist ein Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils bekannt, bei welchem mittels eines interferometrischen Verfahrens Volumendaten der Kavität eines präparierten Zahnes erstellt werden. Um eine Krone zu modellieren, wird ein Volumenmodell eines Modellzahnes in das Tiefenbild eingepaßt. Dazu werden sechs Begrenzungsebenen automatisch berechnet, die den Ort des einzusetzenden Modellzahnes definieren sollen, unter anderem die Begrenzungsebenen zu den Nachbarzähnen. Durch diese Verschiebung und Rotation des Modells wie auch Skalierung und Scherung kann dieses in das Innere der Begrenzungsebenen projiziert werden.

Aus der US 5,273,429 ist ein weiterentwickeltes Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils bekannt, bei dem zur Verbesserung des Einpassens des Modells zunächst eine Vielzahl von Winkeln und Abständen aus den Nachbarzähnen extrahiert werden. Aus diesen Daten werden die Parameter für Verschiebung, Rotation, Skalierung und Scherung des Volumenmodells berechnet, um es an den vorhandenen Zahnstumpf anzupassen.

Den beiden letztgenannten Verfahren ist gemeinsam, daß die Anpassung des Modellzahnes an die Gegebenheiten des präparierten Zahnes nur über lineare Transformationen geschieht, wie Verschiebung, Rotation, Skalierung und Scherung des Volumenmodells des Modellzahnes oder Teilen davon. Eine wirkliche Einpassung, die für einen nahtlosen Übergang vom gegebenen Zahnstumpf zum angepaßten Modellzahn und damit zum zu erstellenden Zahnersatzteil sorgt, kann mit solchen Transformationen jedoch im allgemeinen nicht erreicht werden. Insbesondere die Herstellung von Inlays, bei denen nur ein Teil der Kaufläche restauriert wird, ist mit diesen Verfahren nicht möglich in dem Sinne, daß der noch vorhandene Teil der Kaufläche des präparierten Zahnes bei der Formbestimmung der Restauration nicht berücksichtigt wird.

Ausgehend hiervon liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteiles anzugeben, bei dem unter Berücksichtigung der vorstehend genannten Kriterien der manuelle Aufwand kein Nachkonturieren an der in den präparierten Zahn eingesetzten Restauration und während der Formgestaltung verringert ist. Dies betrifft insbesondere die Schaffung einer natürlich geformten Kaufläche (mit glatten Übergängen zwischen Zahnersatzteil und Restzahn) unter Einbeziehung der noch vorhandenen Restkaufläche des präparierten Zahnes, sowie die Berücksichtigung der Nachbar- und Gegenzähne des prä-

parierten Zahnes.

Zur Lösung dieser Aufgabe wird ein Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils für einen gegebenen präparierten Zahn mit den Merkmalen des Anspruches 1 vorgeschlagen. Demnach wird ein von dem präparierten Zahn vorliegendes digital gespeichertes Tiefenbild mit einem Tiefenbild eines intakten Modellzahnes des gleichen Typs durch Bilddeformation zur Deckung gebracht, worauf die Höheninformation für den präparierten Bereich des präparierten Zahnes aus dem deformierten Tiefenbild des Modellzahnes übernommen wird. Daran schließt sich eine Höhenangleichung der übernommenen Höheninformation an die Höhenwerte des Zahnstumpfes am Rand des präparierten Bereiches des präparierten Zahnes an, so daß ein glatter Übergang vom restaurierten Bereich zum präparierten Zahn geschaffen wird und eine natürlich geformte Zahnform entsteht. Die Oberflächendaten im restaurierten Bereich werden zur Herstellung des benötigten Zahnersatzteils an eine rechnergesteuerte Werkzeugmaschine geleitet, mittels welcher das Zahnersatzteil aus einem Materialrohling gefertigt wird. Die dazu des weiteren benötigten Oberflächendaten der Unterseite der Restauration zur Anpassung an die Form der Kavität sowie ergänzend die Daten der unterhalb des Zahnäquators liegenden Flächen der Restauration können auf an sich bekannte Weise ermittelt werden.

Somit wird das an sich bekannte Verfahren der Bilddeformation ausgenutzt, um aus den vorhandenen Daten eines Modellzahnes den nicht mehr vorhandenen Bereich eines präparierten Zahnes möglichst genau nachzuahmen. Dies erfolgt mit einer hohen Genauigkeit, so daß der Aufwand für Nacharbeiten mit dem erfindungsgemäße Verfahren verringert wird.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung wird das Tiefenbild des Modellzahnes in der Zahnaußenkontur und in inneren Merkmalspunkten der Kaufläche durch Bilddeformation mit dem Tiefenbild des präparierten Zahnes zur Deckung gebracht. Durch die Formangleichung des Modellzahnes an den präparierten Zahn in der Außenkontur wird der geforderte glatte Übergang von der Restauration zum Restzahn gewährleistet. Die Wahl charakteristischer Punkte innerhalb der Kauflächen sorgt in vorteilhafter Weise für die Schaffung einer natürlichen Zahnform, die die noch vorhandenen Oberflächenstrukturen des präparierten Zahnes voll berücksichtigt, und daher den Aufwand des Nachkonturierens und die Gefahr dabei auftretender Beschädigung gesunder Zahnschubstanz weiter vermindert.

In weiterer Ausgestaltung des Verfahrens werden eine Anzahl von auf Außenkonturlinien der intakten Zahnbereiche des präparierten Zahnes und entsprechenden Außenkonturlinien des Modellzahnes liegenden Punkten in den Tiefenbildern des präparierten Zahnes und des Modellzahnes bestimmt und als zur Durchführung der Bilddeformation benötigte Kontrollpunkte einander paarweise zugeordnet. Die für die Bilddeformation benötigten Kontrollpunkte auf den Außenkonturlinien des präparierten Zahnes und des Modellzahnes werden vorteilhafterweise in den Tiefenbildern mit Hilfe des an sich bekannten Verfahrens aktiver Konturen bestimmt (Kass et al: Snakes: Active Contour Models, Proc. First Int. Conf. on Computer Vision (ICCV), London 1987, S. 259—268). Dies hat den Vorteil, daß einerseits die genaue Form intakter Bereiche der Außenkonturen automatisch bestimmt wird, andererseits kleinere Unterbrechungen der Außenkonturlinie des präparierten Zahnes durch das Verfahren interpoliert werden.

Bei größeren Unterbrechungen reichen ein oder zwei zusätzlich durch die Bedienperson im Tiefenbild markierte Stützpunkte aus, um die Außenform des restaurierten Zahnes vollständig zu bestimmen. Dies miniert in vorteilhafter Weise den manuellen Aufwand der Bedienperson bei dennoch optimaler Formgestaltung der Restauration.

In vorteilhafter Ausgestaltung des Verfahrens wird die Höhenangleichung durch Interpolation der unbekannten Höhenunterschiede zwischen der übernommenen Höheninformation und den ursprünglichen Höhenwerten aus den bekannten Höhenunterschieden am Rand des präparierten Bereiches des präparierten Zahnes durchgeführt, wobei durch Addition der interpolierten Differenzwerte und der Tiefenwerte des aus dem Modellzahn entnommenen Bereiches ein stetiger Übergang zwischen der zu restaurierenden Fläche des präparierten Zahnes und des übernommenen Bereiches des Modellzahnes hergestellt wird. Auf diese Weise werden ausgehend von Daten eines Modellzahnes gleichen Typs Daten für die Oberfläche des zu restaurierenden Zahnes und somit für das Zahnersatzteil gewonnen, ohne daß diese Daten explizit bekannt sein müßten oder durch eine Bedienperson oder einen Zahntechniker nachempfunden werden müßten.

In weiterer Ausgestaltung des Verfahrens wird bei der Höhenangleichung auch die Form von Antagonisten des präparierten Zahnes berücksichtigt. Damit wird das geforderte Kriterium der okklusalen Paßform der Restauration erfüllt.

Vorteilhafterweise erfolgt die Berücksichtigung der Form der Antagonisten des präparierten Zahnes, indem bei der Höhenangleichung zusätzlich Stützpunkte verwendet werden, die aus Tiefenbildern der Antagonisten des präparierten Zahnes sowie aus Tiefenbildern einer Bißplatte, die durch Aufbeißen zwischen den betroffenen Zähnen plastisch deformiert ist, oder aus durch einen flächenförmigen Drucksensor gewonnenen Daten berechnet werden.

Das Verfahren wird anhand eines Ausführungsbeispiels im folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnung ausführlich erläutert.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Verfahrens zur Herstellung eines Zahnersatzteils.

Fig. 2 zeigt ein Tiefenbild eines präparierten Seitenzahnes mit bereits markierter und ausmaskierter Kavität.

Fig. 3 zeigt eine dreidimensionale Darstellung des präparierten Seitenzahnes der Fig. 2.

Fig. 4 zeigt eine Kontursegmentierung des präparierten Seitenzahnes der Fig. 2.

Fig. 5 zeigt den präparierten Seitenzahn der Fig. 2 und 4 mit eingezeichneten charakteristischen Punkten.

Fig. 6 und 7 zeigen das Tiefenbild eines weiteren präparierten Seitenzahnes und dienen zur Veranschaulichung der Kontursegmentierung mit Unterstützung einer Bedienperson.

Fig. 8 zeigt das isolierte und mit charakteristischen Punkten markierte Tiefenbild eines verwendeten Modellzahnes.

Fig. 9 zeigt die Abbildung detektierter Merkmalspunkte auf dem Modellzahn der Fig. 8.

Fig. 10 zeigt das Tiefenbild des Modellzahnes der Fig. 8 nach einer Bilddeformation.

Fig. 11 zeigt das Tiefenbild der restaurierten Kaufläche nach einer Höhenanpassungsinterpolation.

Fig. 12 zeigt eine dreidimensionale Darstellung des Tiefenbildes der Fig. 11.

Fig. 13 zeigt eine dreidimensionale Darstellung des für den präparierten Seitenzahn der Fig. 2 zu erstellenden Zahnersatzteiles.

In der schematischen Darstellung der Fig. 1 ist der Ablauf des Verfahrens für die Herstellung eines Inlays für die Kaufläche eines Seitenzahnes dargestellt. Nachfolgend wird die Funktionsweise dieses Verfahrens unter Bezugnahme auf die Darstellungen der Fig. 2 bis 13 erläutert.

Fig. 2 zeigt einen zu restaurierenden Seitenzahn 10 mit einer bereits präparierten Kavität 12 sowie Teilen von Nachbarzähnen 14, 16 in Form eines Tiefenbildes. Nachdem der zu restaurierende Seitenzahn 10 durch Ausbildung einer Kavität 12 präpariert worden ist, wird das dargestellte Tiefenbild des präparierten Zahnes 10 aufgenommen. Dann werden im Tiefenbild die sichtbaren Zähne 10, 14, 16 mit Hilfe eines Maskenverfahrens grob lokalisiert und die Kavität wird markiert (Fig. 2). Als Vorverarbeitungsschritt zur Lokalisierung ist dabei die Anwendung eines Kantenoperators auf das Tiefenbild notwendig, wie beispielsweise der an sich bekannte Sobeloperator (H. Niemann: Klassifikation von Mustern, Sprihger, Berlin, 1983). Im Bereich einer ringförmigen Maske, die in einem vorher festgelegten Suchbereich an verschiedenen Positionen auf das Tiefenbild gelegt wird, werden die Kantenstärkenwerte des Kantenoperators aufsummiert und die Summe wird dem Punkt des Bildes zugeordnet, der die Mitte der Maske bildet. Punkte im Suchbereich, denen auf diese Weise sehr hohe Werte zugeordnet werden, deuten auf Zahnmittelpunkte hin. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, daß dabei auch Zähne lokalisiert werden können, deren Rand nur teilweise sichtbar ist, sei es daß sie am Bildrand liegen oder daß der Zahnrand im Bereich der Kavität liegt. Fig. 3 zeigt eine dreidimensionale Darstellung des präparierten Seitenzahnes 10 mit Kavität 12 der Fig. 2.

Anschließend wird an den detektierten Stellen eine Segmentierung der Zahnaußenkontur vorgenommen. Dies erfolgt vorteilhafterweise mittels des an sich bekannten Verfahrens der aktiven Konturen. Dazu werden die Konturen an den vorher detektierten Positionen initialisiert und ihre Form wird mittels eines iterativen Verfahrens solange verändert, bis die Kantenbewertung der Konturpunkte maximal ist, wobei gleichzeitig die lokale Krümmung der Konturlinie minimiert wird. Unterbrechungen in der Konturlinie werden dabei automatisch oder durch eine Bedienperson interpoliert. Insbesondere kleinere Teile des Zahnrandes, die von dem Defekt betroffen sind, werden automatisch interpoliert.

Als zusätzliche Einschränkung der Konturlinienform werden Überschneidungen der Konturlinien benachbarter Zähne im Bild automatisch detektiert und ihnen durch weitere Beeinflussung der aktiven Konturen entgegengewirkt, indem die Punkte im Überschneidungsbereich zu ihrem Zahnmittelpunkt gezogen werden. Dadurch wird in vorteilhafter Weise der Kontaktpunkt zum Nachbarzahn, der sogenannte Approximalkontakt, durch das Verfahren automatisch bestimmt. Das Ergebnis einer derartigen Kontursegmentierung ist in Fig. 4 für das Tiefenbild der Fig. 2 dargestellt. Zum Erstellen der Konturlinie 18 für den präparierten Seitenzahn 10 wurden 80 Konturpunkte ausgewählt und linear interpoliert. Auch die dem präparierten Seitenzahn 10 benachbarten Zähne 14, 16 wurden in dem in dem Tiefenbild liegenden Bereich einer entsprechenden Kontursegmentierung unterworfen.

Bei Kavitäten, bei denen ein größerer Teil des Zahnrandes betroffen ist, kann die aktive Kontur durch eine Bedienperson zusätzlich beeinflusst werden, indem einige wenige Stützpunkte im Bild gesetzt werden, die anschließend durch die Konturlinie interpoliert werden. Eine derartige Kontursegmentierung mit Unterstützung einer Bedienperson ist in den Fig. 6 und 7 veranschaulicht. In dem Tiefenbild der Fig. 6 und 7 ist ein präparierter Seitenzahn 50 dargestellt, der eine relativ große Kavität 52 aufweist. Mit dem vorstehend beschriebenen Verfahren wurde die in der Fig. 6 mit dem Bezugszeichen 54 versehene Konturlinie ermittelt, die jedoch in dem in der Figur rechts oben liegenden Bereich der Kavität korrekturbedürftig ist, da sie nicht den gesamten Bereich des vormals vorhandenen Zahnumfanges wiedergibt. Dazu wird von einer Bedienperson eine gewisse Anzahl von Punkten vorgegeben, im vorliegenden Fall zwei Punkte, die in der Fig. 6 als weiße Kreuze dargestellt sind. Nach einigen Iterationen des Verfahrens der aktiven Konturen entsteht dann automatisch in der Fig. 7 wiedergegebene und mit dem Bezugszeichen 54' versehene Konturverlauf.

Als nächstes werden ausgewählte Punkte in der Kaufläche des Modellzahnes sowie der Restkaufläche des präparierten Zahnes bestimmt. Dies ist in Fig. 5 veranschaulicht. Fig. 5 zeigt den präparierten Seitenzahn der Fig. 2 und 4 in aus dem Tiefenbild dieser Figuren isolierter Darstellung, wobei im Bereich der Kaufläche 20 des präparierten Seitenzahnes 10 charakteristische Punkte 22, 24 markiert wurden. Die hervorstechendsten Merkmale einer Kaufläche 20 eines Seitenzahnes 10 sind die Zahnhöcker 26. Die Positionen der Spitzen 22 der Zahnhöcker 26 können in einem automatischen Verfahren bestimmt werden, indem nach lokalen Maxima im Tiefenbild gesucht wird. Außerdem werden Punkte 24 in Gräben 28 zwischen den Höckern 26 ermittelt. Die Suche nach diesen kann sich an den zuvor detektierten Höckerspitzen 22 orientieren, beispielsweise indem auf Verbindungslinien zwischen den Höckerspitzen 22 nach den am tiefsten liegenden Punkten 24 gesucht wird.

Um das Verfahren der Bilddeformation anwenden zu können, wird für eine Anzahl von ausgewählten Punkten des Tiefenbildes des verwendeten Modellzahnes 30 die entsprechende Zielposition dieser Punkte im deformierten Bild benötigt, wobei diese Zielpositionen durch die ermittelten charakteristischen oder Merkmalspunkte 22, 24 des präparierten Seitenzahnes 10 gegeben sind (vgl. Fig. 8). Dazu müssen die ermittelten Merkmalspunkte 22, 24 der Kaufläche 20 des zu restaurierenden Zahnes 10 und die Zielpositionen 32, 34 der Kaufläche 31 des Modellzahnes 30 einander paarweise zugeordnet werden. Da wie vorstehend beschrieben mögliche Unterbrechungen der Konturlinie 18 des präparierten Zahnes 10 mittels Interpolation geschlossen wurden (Fig. 4), können die Konturpunkte zweier vollständiger Konturlinien einander zugeordnet werden.

Der Modellzahn 30 wird so ausgewählt, daß es sich um einen dem Typ des präparierten Zahnes 10 entsprechenden Zahn handelt, da die Konturlinie zweier Zähne des gleichen Typs sich in ihrer Form ähnlich sind. Diese Ähnlichkeit kann über die lokale Krümmung an jedem Konturpunkt, seinem Abstand zum Konturschwerpunkt und seinem Abstand zu den nächstliegenden Merkmalspunkten innerhalb der Kaufläche beschrieben werden, wobei diese Kriterien unabhängig von der Lage und Position der Zähne in den Tiefenbildern sind. Die genannten Kriterien können für jeden Konturpunkt berechnet werden. Ein Verfahren zum Abbilden der Kon-

turpunkte aufeinander nutzt die erhaltenen Datenreihen, indem die Datenreihe des Modellzahnes geordnet entlang der Konturlinie so gegenüber derjenigen des präparierten Zahnes verschoben und nichtlinear verzerrt wird, daß ein Abstandsmaß über den Datenreihen minimiert wird. Wenn die Zuordnung der Konturpunkte geschehen ist, lassen sich anhand dieser auch die Merkmalspunkte innerhalb der Kaufläche einander zuordnen. Punkte des Modellzahnes 30, deren korrespondierender Punkt im präparierten Bereich liegt (Punkte 36 in Fig. 8), werden dabei entweder ignoriert oder die entsprechenden Positionen im präparierten Bereich können durch ein weiteres Teilverfahren geschätzt oder durch eine Bedienperson vorgegeben werden.

In Fig. 9 ist das Ergebnis der Abbildung der detektierten Merkmalspunkte dargestellt. Sowohl die Konturpunkte der Konturlinie 18 des präparierten Seitenzahnes 10 wie auch die inneren Merkmalspunkte 22, 24 innerhalb der Kaufläche 20 wurden in einem automatischen Verfahren den entsprechenden Punkten des Modellzahnes 30 zugeordnet. Die Merkmalspunkte 32, 34 des Modellzahnes 30 sind in der Darstellung der Fig. 9 als schwarze Punkte dargestellt, wobei zur Verdeutlichung der Umriß des Modellzahnes 30 verkleinert dargestellt ist und die Zuordnungen durch weiße Linien angezeigt sind.

Nachdem dieses "Matching" der Merkmalspunkte des präparierten Zahnes und des Modellzahnes vorgenommen wurde, erfolgt die Bilddeformation des Tiefenbildes des Modellzahnes.

Zu den wie vorstehend erläutert ermittelten Merkmalspunkten im Tiefenbild des Modellzahnes existieren durch die zugeordneten Merkmalspunkte im präparierten Zahn Zielpositionen, an welche die Merkmalspunkte des Modellzahnes durch die Bilddeformation verschoben werden sollen, was durch die weißen Linien in der Darstellung der Fig. 9 veranschaulicht ist. Punkte zwischen den detektierten Merkmalspunkten werden dabei durch ein geeignetes Interpolationsverfahren "mitgezogen". Anschaulich kann dieser Schritt verdeutlicht werden, indem man sich das Tiefenbild des Modellzahnes auf eine Gummihaut gedruckt vorstellt, die an den ermittelten Merkmalspunkten zu den jeweiligen Zielpositionen gezogen und dort fixiert wird. Das dabei entstehende Bild entspricht annähernd dem des zu restaurierenden Zahnes.

Verfahren der digitalen Bilddeformation, die wie beschrieben arbeiten, sind an sich bekannt (G. Wolberg: Digital Image Warping, WEE CS Press, 1990). Fig. 10 zeigt das Ergebnis 30' einer Bilddeformation des Tiefenbildes des Modellzahnes 30 der Fig. 8.

Das vorläufige Höhenprofil des zu erstellenden Inlays ist nun durch das teilweise deckungsgleiche Tiefenbild des Modellzahnes 30' im Bereich der Kavität 12 gegeben, so daß diese Höheninformation entnommen werden kann.

Als nächster Schritt wird die Höhenangleichung des aus dem deformierten Modellzahn 30' übernommenen Höhenprofils an den Zahnstumpf des präparierten Seitenzahnes 10 vorgenommen.

Die Höhenwerte des übernommenen Bereiches bilden an den Übergängen zum Zahnstumpf 11 des präparierten Seitenzahnes 10 im allgemeinen eine Sprungkante. Die Bilddeformation bringt zwar beide Kauflächen zur Deckung, jedoch ohne direkte Höhendifferenzen zwischen ihnen zu berücksichtigen. In einem weiteren Schritt wird diese Höhendifferenz minimiert und die eingesetzte Oberfläche an das Höhenniveau des Zahn-

stumpfs 11 angepaßt. Dazu werden die Höhenunterschiede beider Kauflächen, vor allem am Kavitätenrand, als Stützpunkte für ein Interpolationsverfahren verwendet, das den Bereich der Kavität 12 interpoliert.

Das Ergebnis dieser Interpolation bildet also eine Schätzung für den Höhenunterschied zwischen der Kaufläche 31 des Modellzahnes 30 und der ursprünglichen im Innern des präparierten Bereiches des zu restaurierenden Zahnes 10. Addiert man die interpolierten Werte auf die Tiefenwerte des deformierten Modellzahnes 30', so ergibt sich ein stetiger Übergang zum Zahnstumpf 11. Aufgrund der vorherigen Angleichung der Kauflächen ergibt sich außerdem eine natürliche Fortsetzung der Oberflächenstruktur des präparierten Zahnes 10.

Vorteilhafterweise wird der Schritt der Höhenangleichung so erweitert, daß in der restaurierten Kaufläche auch die Okklusion mitberücksichtigt ist. Dazu wird zusätzlich ein Tiefenbild der Antagonisten des zu restaurierenden Zahnes erstellt. Des weiteren wird eine Bißplatte aus plastisch deformierbarem Material durch Zubeißen auf die Platte an den betroffenen Zähnen verformt, so daß die Abdrücke auf der Vorder- und Rückseite der Bißplatte verwertet werden können. Alternativ dazu können auch die Daten eines an sich bekannten flächenförmigen Drucksensors (US 4,856,993 und US 4,734,034) verwendet werden. Mit Hilfe eines Korrelationsverfahrens werden die Werte der Tiefenbilder aufeinander abgebildet, so daß Richtwerte für die maximale Höhe des zu restaurierenden Bereiches ermittelt werden können. Diese werden als weitere Stützpunkte in dem vorstehend erläuterten Interpolationsverfahren verwendet. Fig. 11 zeigt das Tiefenbild und Fig. 12 die entsprechende dreidimensionale Darstellung einer erfindungsgemäß restaurierten Kaufläche 20' als Ergebnis der erläuterten Höhenanpassungsinterpolation.

Die erzeugten Tiefenwerte im Bereich der Kavität 12 werden nun zur Berechnung der Volumendaten für das Inlay und zur Ansteuerung einer rechnergesteuerten Werkzeugmaschine zur Herstellung des Inlays verwendet. Fig. 13 zeigt eine dreidimensionale Darstellung der Kaufläche des derart herzustellenden Zahnersatzteiles 40, wobei die Tiefendaten den in den Fig. 11 und 12 dargestellten Daten entsprechen, begrenzt auf den in der Darstellung der Fig. 2 markierten Bereich der Kavität 12.

Durch das Verfahren wird es ermöglicht, vorher gespeicherte Volumendaten intakter Modellzähne für die Restauration von Zahnkauflächen zu verwenden, wobei für die Kavitäten alle in der Praxis zu findenden Varianten in Größe und Form möglich sind. Der präparierte Zahn wird zunächst abgetastet, um ein Volumenmodell des Zahnes zu erhalten. Die Volumendaten eines typgleichen Modellzahnes werden an diesen Zahnstumpf mittels des Verfahrens angepaßt, um die Oberfläche eines Zahnersatzteils zu definieren. Das Verfahren eignet sich insbesondere zur Herstellung von Inlays, die nur einen Teil der Kaufläche ersetzen, wobei die Kaufläche des Inlays glatt in die Kaufläche des Restzahnes eingebettet wird. Das Verfahren arbeitet weitestgehend automatisch, gibt dem behandelnden Zahnarzt jedoch Möglichkeiten der korrigierenden Einwirkung.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils für einen gegebenen präparierten Zahn, dessen Höhenprofil als aus punktweise abgetasteten Höhen-

werten zusammengesetztes digital gespeichertes Tiefenbild vorliegt, wobei zum Bestimmen der Form des Zahnersatzteils ein Tiefenbild eines intakten Modellzahnes desselben Typs wie der präparierte Zahn durch Deformation mit dem Tiefenbild des präparierten Zahnes zur Deckung gebracht, die Höheninformation für den präparierten Bereich des präparierten Seitenzahnes aus dem deformierten Tiefenbild des Modellzahnes übernommen und die übernommene Höheninformation durch Höhenangleichung an die Höhenwerte des Zahnstumpfes am Rand des präparierten Bereiches des präparierten Zahnes angepaßt wird, so daß eine natürlich geformte Zahnform restauriert wird, deren Oberflächenendaten zur Herstellung des Zahnersatzteils aus einem Materialrohling mittels einer rechnergesteuerten Werkzeugmaschine verwendet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, in dem das Tiefenbild des Modellzahnes in der Zahnaußenkontur und in inneren Merkmalspunkten der Kaufläche durch Bilddeformation mit dem Tiefenbild des präparierten Zahnes zur Deckung gebracht wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, in dem eine Anzahl von auf Außenkonturlinien der intakten Zahnbereiche des präparierten Zahnes und entsprechenden Außenkonturlinien des Modellzahnes liegenden Punkten in den Tiefenbildern des präparierten Zahnes und des Modellzahnes bestimmt und als zur Durchführung der Bilddeformation benötigte Kontrollpunkte einander paarweise zugeordnet werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, in dem Unterbrechungen in den Außenkonturlinien des präparierten Zahnes automatisch oder manuell durch eine Bedienperson interpoliert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, in dem zur Bestimmung der Außenkonturlinien das an sich bekannte Verfahren der aktiven Konturen verwendet wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, in dem charakteristische Punkte der Kaufläche ermittelt werden, wonach die ermittelten Punkte in einem weiteren Schritt einander paarweise zugeordnet werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, in dem die Höhenangleichung durch Interpolation der unbekannten Höhenunterschiede zwischen der übernommenen Höheninformation und den ursprünglichen Höhenwerten aus den bekannten Höhenunterschieden am Rand des präparierten Bereiches des präparierten Zahnes durchgeführt wird, wobei durch Addition der interpolierten Differenzwerte und der Tiefenwerte des aus dem Modellzahn entnommenen Bereiches ein stetiger Übergang zwischen der zu restaurierenden Fläche des präparierten Zahnes und des übernommenen Bereiches des Modellzahnes hergestellt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, in dem die Form von Antagonisten des präparierten Zahnes berücksichtigt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, in dem die Berücksichtigung der Form der Antagonisten des präparierten Zahnes dadurch erfolgt, daß bei der Höhenangleichung zusätzlich Stützpunkte verwendet werden, die aus Tiefenbildern der Antagonisten des präparierten Zahnes sowie aus Tiefenbildern einer Bißplatte, die durch Aufbeißen zwischen den be-

troffenen Zähnen plastisch deformiert wird, oder
aus durch einen flächenförmigen Drucksensor ge-
wonnenen Daten berechnet werden.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

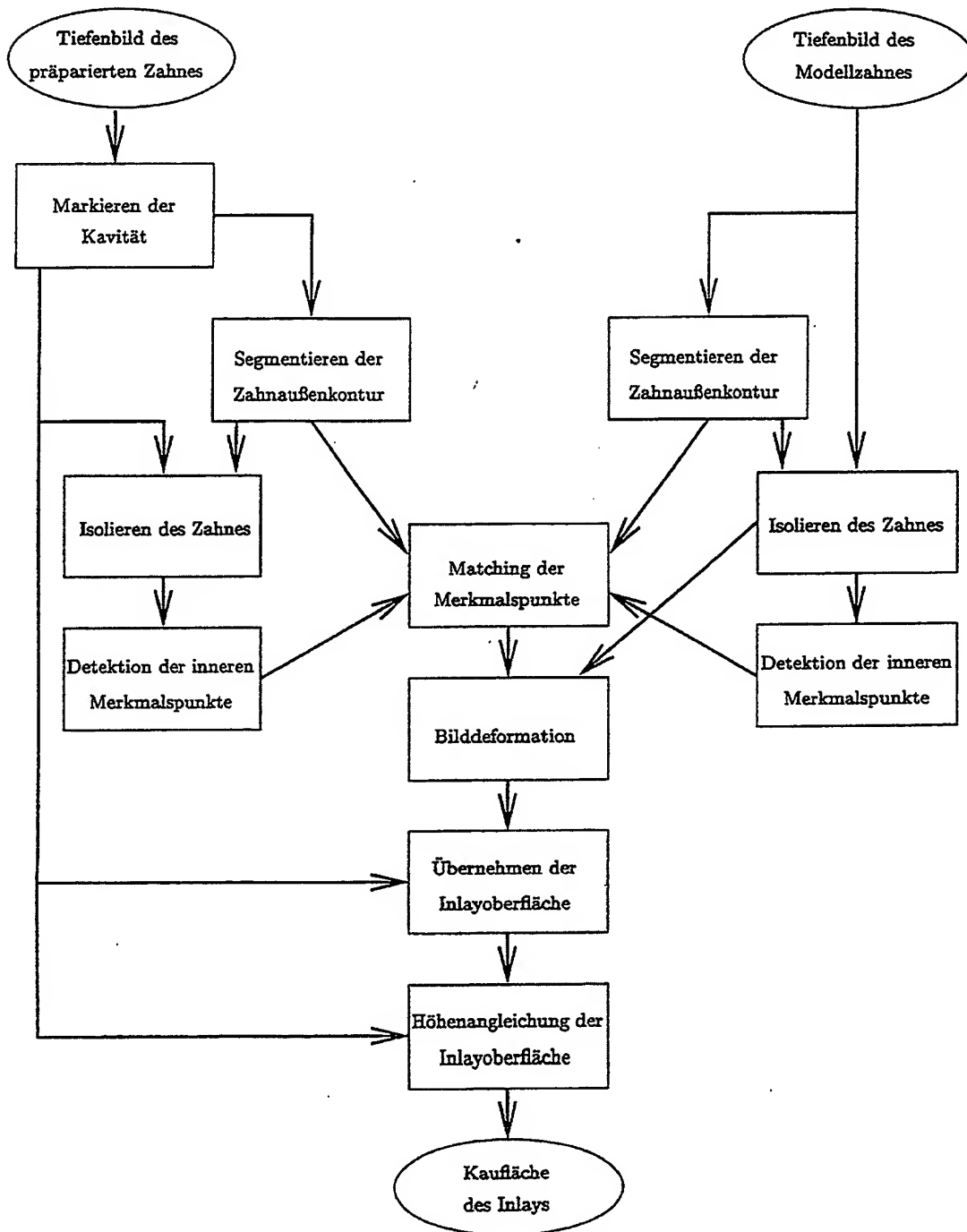
45

50

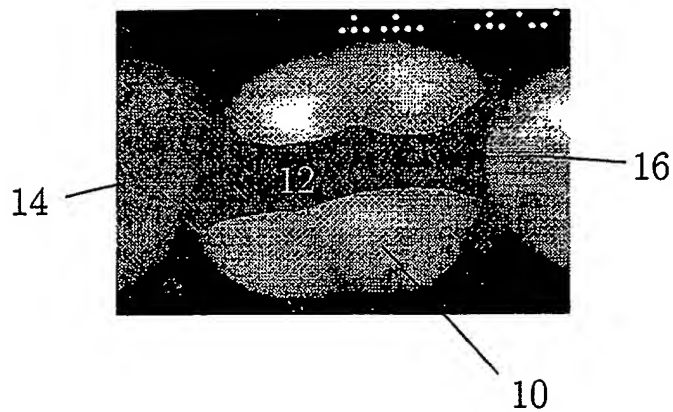
55

60

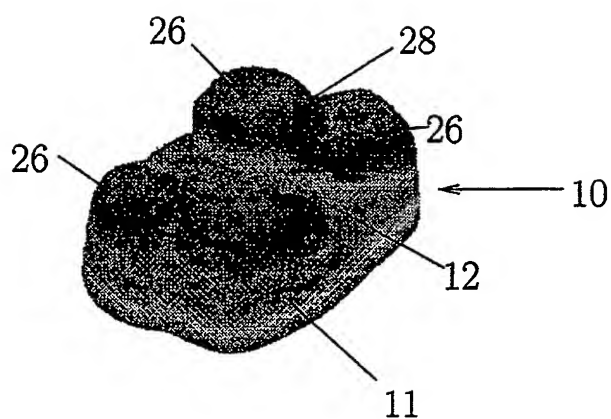
65



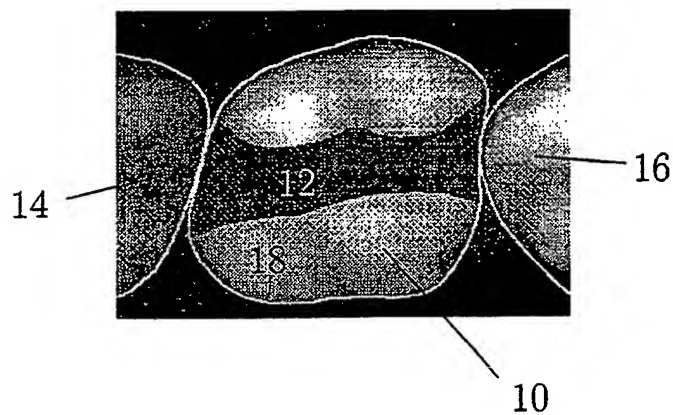
Figur 1



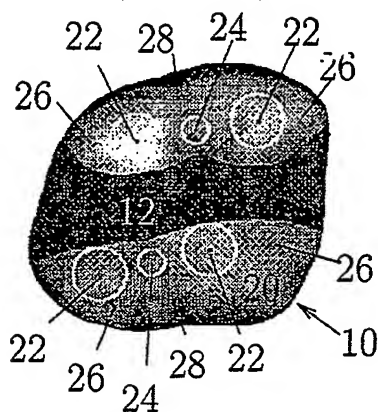
Figur 2



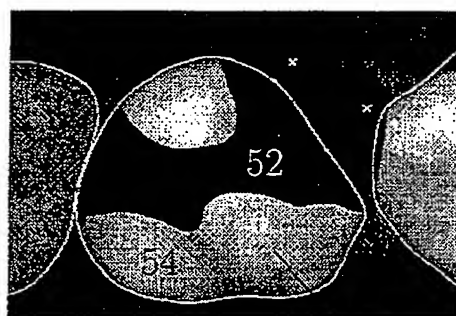
Figur 3



Figur 4

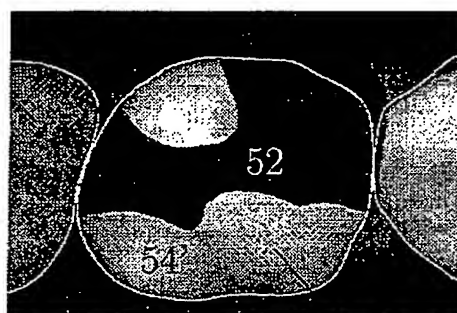


Figur 5



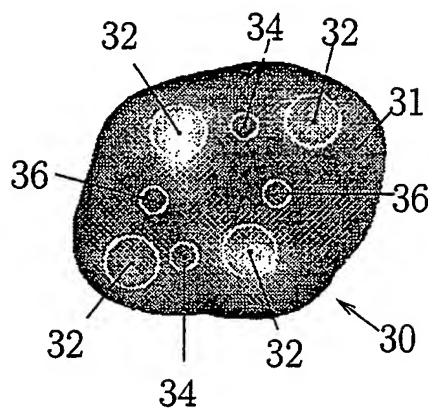
50

Figur 6

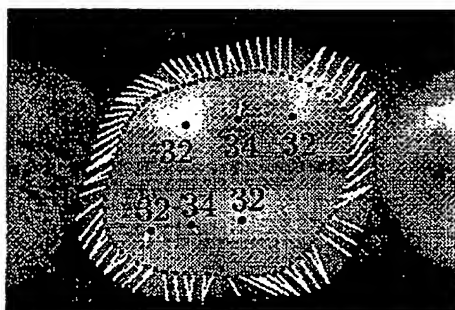


50

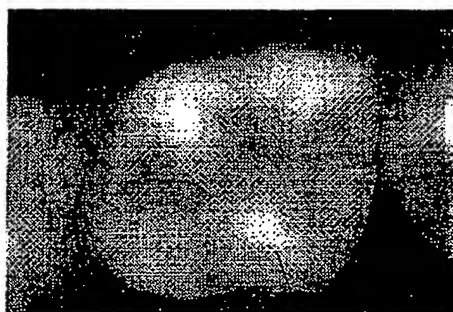
Figur 7



Figur 8

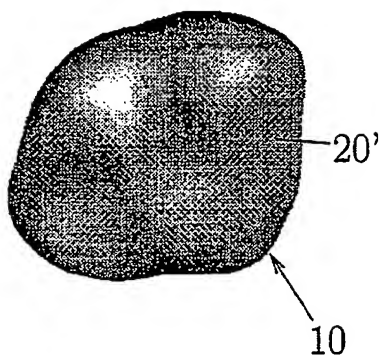


Figur 9

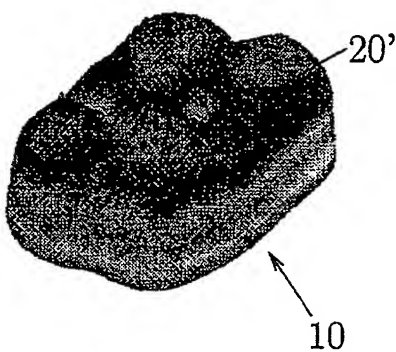


30'

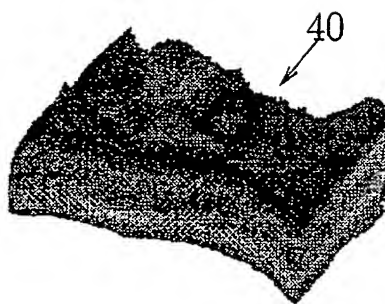
Figur 10



Figur 11



Figur 12



Figur 13